Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 4, Winter 2024, p. 385-401

Simulating the Effects of Climate Change on Phenology and Yield of Maize (*Zea mays* L.) and Possible Adaptation Strategies under the Climatic Conditions of Kermanshah

F. Mondani[1*], P. Karami[2], R. Ghobadi[3]

1- Associate Professor in Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
2- MSc Student in Agroecology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
3- PhD Graduate in Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: f.mondani@razi.ac.ir)

Received: 02 March 2023 Revised: 25 May 2023 Accepted: 31 May 2023	**How to cite this article:** Mondani, F., Karami, P., & Ghobadi, R. (2024). Simulating the Effects of Climate Change on Phenology and Yield of Maize (*Zea mays* L.) and Possible Adaptation Strategies under the Climatic Conditions of Kermanshah. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *21*(4), 385-401. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81417.1232

Introduction

Global warming directly affects agricultural production and food security (Ainsworth & Ort, 2010). Temperature controls the rate of plant metabolic processes that ultimately affect biomass production and grain yield (Hay & Walker, 1981). Although farmers are not able to control the climatic conditions, management and changes in factors such as irrigation, soil, crop varieties, activities, and technologies used in the cultivation of crops can reduce the harmful effects of climate change (Moradi *et al.*, 2014). One of the reliable approaches to studying the effects of climate change on agricultural production is using crop growth models. The present study was conducted to simulate the effects of climate change on phonological stages and yield of maize and to investigate the possibility of mitigating the negative effects of climate change on maize by changing the sowing date and selecting suitable cultivars as management strategies for adaptation to climate change in Kermanshah region.

Materials and Methods

The study was conducted in Kermanshah region conditions. The evaluated traits included days from the sowing date to anthesis, days from the sowing date to physiological maturity, total dry weight, and grain yield. In general, the results of the evaluations showed that the CERES-Maize model can accurately predict the growth and yield of maize cultivars (SC704, Simon, BC678) in different soil moisture conditions. After ensuring acceptable agreement between simulated values with observed values, the evaluated model was used to study the effects of climate change on maize production in the near future (2021-2050) and the far future (2051-2080) climate change according to RCP4.5 and RCP8.5 scenarios and comparing them with baseline conditions (1981–2010). The average of 17 general circulation models was used to simulate meteorological parameters under climate change conditions**.** The common sowing date for maize in the Kermanshah region is May 5. In this study sowing dates of May 5 and April 26 as early sowing dates, April 15 as the common sowing dates, and May 25 and June 4 as the late sowing dates, and maize cultivars SC704, BC678, and Simon were considered as adaptation strategies to climate change.

Results and Discussion

https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81417.1232

The results of simulation showed that regardless of cultivar and sowing date, traits of days from sowing date to anthesis, days from sowing date to physiological maturity, total dry weight and grain yield in the near future climate change in the scenario RCP4.5 varied as -2, -1.5, 2.7, and 3.3% and in the RCP8.5 scenario varied as, -2.9, -2.8, -0.66, and -3.6% compared to baseline conditions, respectively. These values for the RCP4.5 scenario in the far future climate change condition were -5.2, -5.4, -7.1, and -16.2 and for the RCP8.5 scenario were -8.8, -9.8, -23.1, and -45.83%, respectively. In both near and far future climate changes and under both scenarios, by sowing the studied cultivars at late dates (May 15 and May 25) compared to the early dates (April 15 and April 25) and common date (May 5), the length of the developmental period was shorter but other traits such as total dry weight and grain yield were higher. Among the studied cultivars, in both future climate changes and scenarios, the Simon cultivar had the highest grain yield. The highest duration of developmental stages and total dry weight belonged to SC704.

Conclusion

In general, if any of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios occur in the near and far future climate change periods, the sowing of the Simon cultivar should be in late dates on May 25 and will have the highest grain yield. Therefore, it can suggest as a suitable strategy to reduce the negative effects of climate change on maize production in the Kermanshah region.

Keywords: Adaptation strategy, CERES-Maize model, Cultivar, Sowing date

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۱، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٤٠١-٣٨٥

شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیک و عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) و ارائه راهکارهای سازگاری تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه

فرزاد مندنی[1*]، پریسا کرمی[2]، روژین قبادی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

چکیده

پدیده گرمایش جهانی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر میزان تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیک و عملکرد ذرت در شرایط اقلیمی کرمانشاه و ارائه راهکارهای سازگاری به این تغییرات انجام شد. صفات مورد ارزیابی شامل تعداد روز از کاشت تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک، وزن خشک کل و عملکرد دانه بود. پس از کسب اطمینان از تطابق قابل‌قبول بین مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی برای صفات مذکور، از مدل CERES-Maize برای مطالعه اثر تغییرات اقلیم بر تولید ذرت در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و مقایسه آن با شرایط مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) استفاده شد. برای شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی در شرایط تغییر اقلیم از میانگین نتایج ۱۷ مدل گردش عمومی استفاده شد. تغییر تاریخ کاشت (۵ اردیبهشت، ۲۶ فروردین، ۱۵ اریبهشت، ۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) و رقم (SC704, Simon, BC678) به‌عنوان راهکارهای سازگاری در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد صفات روز از کاشت تا گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک، وزن خشک کل و عملکرد دانه در شرایط تغییر اقلیم نزدیک در سناریوی RCP4.5 نسبت به شرایط مبنا به‌ترتیب، ۵/۱-، ۴/۱-، ۲/۷ و ۳/۳ درصد و در سناریوی RCP8.5 به‌ترتیب، ۶/۲-، ۵/۴-، ۰/۶۶- و ۳/۶- درصد تغییر کرد. این مقادیر در شرایط تغییر اقلیم دور و سناریوی RCP4.5 به‌ترتیب، ۵/۲-، ۵/۴-، ۷/۱- و ۱۶/۲- درصد و برای سناریوی RCP8.5 به‌ترتیب، ۸/۸-، ۹/۸-، ۲۳/۱- و ۴۵/۸- درصد بودند. در هر دو دوره اقلیمی آینده و طبق هر دو سناریو با کاشت ارقام مورد بررسی در تاریخ‌های دیرهنگام در مقایسه با تاریخ‌های زودهنگام و رایج، طول مراحل نمویی کوتاه‌تر ولی وزن خشک کل و عملکرد دانه بیشتر بود. در بین ارقام مورد بررسی نیز در هر دو دوره اقلیمی آینده و هر دو سناریو، رقم Simon بیشترین عملکرد دانه را داشت. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده کاشت رقم Simon در تاریخ ۴ خرداد که در هر دو دوره اقلیمی آینده و هر دو سناریو مورد بررسی بیشترین عملکرد را داشت، می‌تواند به‌عنوان راهکاری برای مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید ذرت منطقه کرمانشاه پیشنهاد گردد.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، راهکار سازگاری، رقم، مدل CERES-Maize

مقدمه

گرمایش جهانی به‌طور مستقیم روی تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی تأثیر می‌گذارد (Ainsworth & Ort, 2010). دما سرعت فرآیندهای متابولیکی گیاه را که در نهایت بر تولید بیوماس و عملکرد دانه تأثیر می‌گذارند، کنترل می‌کند (Hay & Walker, 1989). دماهای بالا همچنین ریسک خشکی، محدودیت سرعت فتوسنتز و کاهش تشعشع جذبی را از طریق افزایش سرعت نمو، افزایش می‌دهند (Tubiello, Soussana, & Howden, 2007). تنش گرمای ناشی از تغییر اقلیم در آینده به احتمال زیاد به محدودیت‌هایی برای تولید ذرت (*Zea mays* L.) تبدیل می‌شود (Cairns *et al.*, 2013). لابل و بارکی (Lobell & Burke, 2010) نشان دادند که افزایش دو درجه سانتی‌گراد به میانگین دمای طول دوره رشد، تأثیر بیشتری در کاهش عملکرد ذرت در مقایسه با ۲۰ درصد کاهش بارندگی دارد. در مطالعه‌ای دیگر در تانزانیا نشان داده شد که افزایش

۱- دانشیار اکولوژی گیاهان زارعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد اگرواکولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- دانش‌آموخته دکترای فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: f.mondani@razi.ac.ir
https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81417.1232

دما نسبت به تغییرات درون فصلی بارندگی اثرات فراوانی بر کاهش عملکرد ذرت دارد، به طوری که افزایش میانگین دمای طول دوره رشد به میزان دو درجه سانتی‌گراد عملکرد ذرت را ۱۳ درصد کاهش داد، در صورتی‌که با ۲۰ درصد افزایش تغییرات درون فصلی بارندگی، عملکرد ذرت فقط ۴/۲ درصد کاهش یافت (Rowhani, Lobell, Linderman, & Ramankutty, 2011).

تنش گرما در ذرت از طریق کوتاه کردن چرخه زندگی گیاه (Muchow, Sinclair, & Bennett, 1990) کاهش فتوسنتز (Crafts-Brander & Salvucci, 2002) و عقیمی دانه گرده (Schoper, Lambert, & Vasilas, 1987) منجر به کاهش عملکرد می‌گردد. آسیب تنش گرما زمانی که در مراحل حساس نموی گیاه به‌ویژه مرحله زایشی رخ می‌دهد بسیار شدید است (Teixeira, Fischer, Velthuizen, Walter, & Ewert, 2013). مطالعات بسیاری نشان می‌دهد که افزایش دما در طول دوره گلدهی ذرت از طریق کاهش باروری و زنده ماندن دانه‌های گرده، عملکرد دانه این گیاه را کاهش می‌دهد (Hatfield & Prueger, 2015). بنابراین عدم هم‌زمانی دوره حساس گلدهی با دماهای بالا می‌تواند به کاهش اثرات سوء تنش گرما کمک شایانی کند (Rahimi-Moghaddam, Kambouzia, & Deihimfard, 2018).

با توجه به روند تغییرات اقلیمی اخیر و گرم شدن هوا به نظر می‌رسد که کشت و کار ذرت به‌عنوان یک گونه با مسیر فتوسنتزی چهار کربنه اهمیت بیشتری پیدا کند. حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به دمای بالا مرحله گلدهی آن است که افزایش دما طول این دوره را کاهش می‌دهد (Khabba, Ledent, & Lahrouni, 2001) و به دلیل کوتاه شدن دوره گلدهی و از طرفی طول فصل رشد ذرت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین ممکن است عملکرد دانه ذرت در این شرایط کاهش یابد (Trnka, Dubrovsky, & Ekzalud, 2004). الکساندرو و هوگنبوم (Alexandrov & Hoogenboom, 2000) اثر تغییرات اقلیمی را بر عملکرد ذرت برای دوره‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ شبیه‌سازی کردند و گزارش کردند که کاهش عملکرد در دوره ۲۰۸۰ نسبت به دو دوره دیگر کمتر بود و حداکثر عملکرد شبیه‌سازی‌شده در سه دوره به‌ترتیب، ۷، ۶/۲ و ۵/۳ تن در هکتار بود. لی و همکاران (Li, Takahashi, Suzuki, & Kaiser, 2011) با بررسی تغییرات اقلیمی بر عملکرد ذرت گزارش کردند که تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۳۰ منجر به کاهش عملکرد در آمریکا و چین به‌ترتیب در حدود ۸ و ۲۳ درصد خواهد شد. همچنین سوتوورد و همکاران (Southworth *et al.*, 2000) بیان کردند که افزایش درجه حرارت در مناطق میانی آمریکا منجر به تغییر عملکرد ذرت در این منطقه بین ۵- تا ۵۰- درصد تا ۵۰ سال آینده خواهد شد. مرادی و همکاران (Moradi, Koocheki, & Nassiri Mahallati, 2014) تأیید کردند که تغییرات اقلیمی در ایران بیشترین تأثیر را در مرحله گلدهی ذرت خواهد داشت و با کاهش درصد و دوره تلقیح گل منجر به کاهش عملکرد ذرت می‌شود.

اگرچه کشاورزان قادر نیستند شرایط اقلیمی را کنترل کنند، ولی مدیریت و تغییر در فاکتورهایی چون آبیاری، خاک، رقم، فعالیت‌ها و تکنولوژی‌های مورد استفاده در کشت محصولات زراعی می‌تواند در کاهش اثرات مضر تغییر اقلیم بر رشد، نمو و عملکرد محصولات کشاورزی نقش به‌سزایی داشته باشد (Moradi *et al.*, 2014). تخفیف[1] و سازگاری[2] دو روش شناخته‌شده برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم است (Ozkan & Akcaoz, 2002). سازگاری استراتژی‌های است که در آن‌ها رشد و نمو گیاه به گونه‌ای می‌گردد که کمتر در معرض تغییرات اقلیمی به‌وقوع پیوسته قرار گیرد (Rosenzweig & Tubiello, 2007). راهکارهای سازگاری بسته به سیستم کشاورزی منطقه و سناریوهای تغییر اقلیمی متفاوت است. از جمله این استراتژی‌ها می‌توان به تغییر تاریخ کاشت، تراکم کاشت، استفاده از ارقام مقاوم به شرایط گرم‌تر، تغییر در تناوب کاشت و مدیریت آبیاری اشاره کرد (Smit & Skinner, 2002; Tubiello, Jagtap, Rosenzweig, Goldberg, & Jones, 2002).

با توجه به اهمیت تولید ذرت، تغییرات اقلیمی می‌تواند اثرات منفی خود را در زمینه کاهش عملکرد در منطقه مورد بررسی و در سطح کشور نشان دهد. بنابراین برای مقابله با کاهش عملکرد حاصل از تغییرات اقلیمی آینده اصلاح و تغییر مدیریت زراعی در قالب راهکارهای سازگاری ضروری می‌باشد. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی می‌توان از طریق گزینه‌هایی مانند تنظیم تاریخ کاشت، تغییر الگوی کشت و کشت ارقام مقاوم به گرما، اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی را کاهش داد (Tingem & Rivington, 2009). الکساندرو و هوگنبوم (Alexandrov & Hoogenboom, 2000) در مطالعه‌ای اثر تغییر اقلیم را بر عملکرد گندم (*Triticum aestivum*) و ذرت در بلغارستان ارزیابی کردند و نشان دادند که اقدامات سازگاری برای کاهش تأثیر بالقوه تغییر اقلیم بر تولید ذرت در بلغارستان شامل تغییرات احتمالی در تاریخ کاشت و انتخاب هیبرید است. عدم هم‌زمانی دوره حساس گلدهی با دماهای بالا می‌تواند به کاهش اثرات سوء تنش گرما به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم کمک کند (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2018). تحقیقات دیگر نیز نشان دادند که تغییر روش‌های مدیریتی مانند استفاده از تاریخ کاشت‌های زودهنگام، می‌تواند برای فرار از تنش گرما و کاهش ریسک به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم در نظر گرفته شود (Zheng, Chenu, Deccer, & Chapman, 2012; Liu, Hubbard, Lin, & Yang, 2013). در تحقیقی دیگر وانگ و همکاران (Wang, Rui, Shen, & Zhang, 2008) نشان دادند که

1- Mitigation
2- Adaptation

تاریخ کاشت‌های زودهنگام باعث کاهش اثرات منفی حاصل از افزایش دما بر عملکرد گیاه زراعی می‌شود. بنابراین با توجه به سطح زیر کشت قابل‌توجه ذرت در استان کرمانشاه این مطالعه با هدف شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و نمو ذرت و همچنین ارائه راهکارهای سازگاری به این تغییرات به‌منظور کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم، تحت شرایط اقلیم پایه منطقه کرمانشاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهرستان کرمانشاه است که در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا واقع شده است. براساس تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن اقلیم منطقه سرد و نیمه‌خشک است. منطقه مورد نظر دارای متوسط بارندگی سالیانه ۴۴۴/۷ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد و حداکثر و حداقل درجه حرارت مطلق سالیانه به‌ترتیب ۴۴/۱ و ۲۷- درجه سانتی‌گراد است.

شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم

به‌منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های مورد ارزیابی گیاه ذرت از مدل CERES-Maize موجود در بسته نرم‌افزاری DSSAT v4.6 استفاده شد (Hoogenboom *et al.*, 2015). برای شبیه‌سازی توسط مدل CERES-Maize ابتدا لازم است که داده‌های مورد نیاز در قالب فایل‌های خاصی سازمان‌دهی و به‌عنوان ورودی‌ها به مدل معرفی شوند. اطلاعات مدیریت زراعی توسط ابزار XBUILD به مدل ارائه می‌شود که شامل تاریخ کاشت، روش کاشت، عمق کاشت، فاصله ردیف‌های کاشت، تراکم بوته در واحد سطح، تاریخ، نوع، مقدار و روش کاربرد کود، روش آبیاری، راندمان آبیاری، تاریخ آبیاری و مقدار آب مصرفی در هر مرحله از آبیاری هستند که از مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی جمع‌آوری و در پنجره‌های مربوطه وارد شدند.

اطلاعات هواشناسی توسط ابزار WeatherMan برای مدل تعریف می‌شود. اطلاعات روزانه هواشناسی مورد نیاز (حداکثر و حداقل درجه حرارت، مقدار بارش و تشعشع روزانه) شهرستان کرمانشاه برای دوره مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) از سازمان هواشناسی استان کرمانشاه اخذ شد. خروجی ۱۷ مدل گردش عمومی (BCC-CSM1-1، -BCC، CSM1-1-M، CSIRO-Mk3-6-0، FIO-ESM، GFDL-CM3، GFDL-ESM2G، GFDL-ESM2M، GISS-E2-H، -GISS، E2-R، HadGEM2-ES، IPSL-CM5A-LR، -IPSL-CM5A، MR، MIROC-ESM، MIROC-ESM-CHEM، MIROC5، MRI-CGCM3، NorESM1-M) به‌عنوان اطلاعات هواشناسی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) در سه تکرار برای سناریوهای تغییر اقلیمی مدنظر (RCP8.5 و RCP4.5) از سایت مارکسیم استخراج شد (MarkSim, 2018). بر این اساس برای هر یک از دوره‌های اقلیمی مدنظر ۹۰ سال داده هواشناسی از سایت مذکور استخراج گردید و به‌عنوان ورودی مدل در فایل هواشناسی قرار داده شد تا نوسانات احتمالی در داده‌های هواشناسی به حداقل ممکن کاهش یابد. غلظت دی‌اکسید کربن برای شرایط مبنا ۳۸۰ پی‌پی‌ام در نظر گرفته شد. این غلظت طبق سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای آینده نزدیک به‌ترتیب، ۴۷۰ و ۵۳۰ پی‌پی‌ام و برای آینده دور به‌ترتیب، ۵۶۰ و ۷۷۰ پی‌پی‌ام در نظر گرفته شد (RCP, 2014). لازم به ذکر است که غلظت‌های نام برده میانگینی از غلظت‌های سالیانه هر یک از دوره‌های تغییر اقلیم نزدیک و دور می‌باشد. برای ساخت فایل خاک‌شناسی از ابزار SBUILD استفاده می‌شود. اطلاعات استفاده شده برای ساخت فایل خاک‌شناسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

مدل CERES-Maize قبلا برای ارقام SC704, Simon و BC678 در منطقه مورد مطالعه واسنجی (Mondani, 2018) و اعتبارسنجی (Mondani, Karami, & Ghobadi, 2021) شده است که نتایج در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی حاکی از دقت قابل‌قبول مدل در پیش‌بینی رشد و نمو ذرت بود. لذا شبیه‌سازی صفات تعداد روز از کاشت تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک، وزن خشک کل و عملکرد دانه در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 توسط مدل CERES-Maize انجام و تغییرات آن‌ها در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) محاسبه و تحلیل شد.

راهکارهای سازگاری به شرایط تغییر اقلیم

به‌منظور امکان تعدیل اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید ذرت در منطقه مورد مطالعه، تغییر تاریخ کاشت و رقم به‌عنوان راهکارهای سازگاری در نظر گرفته شدند. تاریخ رایج برای کاشت ذرت در منطقه کرمانشاه ۱۵ اردیبهشت می‌باشد. از آن‌جایی که حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به گرما، مرحله گلدهی آن است و افزایش دما طول این دوره را کاهش می‌دهد، بنابراین هر نوع تغییر در تاریخ برخورد این مرحله با دماهای بالا می‌تواند به شدت در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید گیاه موثر باشد (Khabba *et al.*, 2001). در این مطالعه برای ارائه راهکارهای سازگاری ذرت به شرایط اقلیمی آینده، تاریخ کاشت‌های ۵ اردیبهشت و ۲۶ فروردین به‌عنوان کشت زودهنگام، ۱۵ اریبهشت به‌عنوان کشت به‌هنگام و ۲۵ اردیبهشت و ۴

خرداد به‌عنوان کشت دیرهنگام و ارقام ذرت Simon ،BC678، SC704 در نظر گرفته شدند. با توجه به شرایط در نظر گرفته‌شده به‌عنوان راهکارهای سازگاری، برای هر یک از دوره‌های اقلیمی نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) مدل CERES-Maize ۱۳۵۰ مرتبه (۵ تاریخ کاشت × ۳ رقم × ۹۰ ورودی هواشناسی) اجرا گردید و سپس میانگین خروجی‌های مدل برای شرایط نام‌برده به‌عنوان اطلاعات مورد ارزیابی برای هر یک از دوره‌های اقلیمی استخراج گردید. در پایان پس از استخراج اطلاعات مدنظر برای هر یک از دوره‌های اقلیمی، از طریق مقایسه این اطلاعات با خروجی مدل برای دوره مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱)، بهترین راهکار سازگاری برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر رشد و تولید ذرت در منطقه کرمانشاه معرفی گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical properties of the experiment soil

ویژگی‌های خاک Soil traits	عمق Depth (0-30 cm)	عمق Depth (30-60 cm)
Texture بافت	Clay-Silt	Clay-Silt
Clay (%) رس	24.00	27.20
سیلت Silt (%)	39.00	38.70
Sand (%) شن	37.00	34.10
pH	7.55	7.60
Cation exchange capacity (meq.100g) ظرفیت تبادل کاتیونی	18.50	-
Soluble salts (dS.cm^{-2}) املاح محلول	0.60	-
Organic carbon (%) کربن آلی	1.17	1.12
Total N (%) نیتروژن کل	0.17	0.11
Absorbable P (ppm) فسفر قابل جذب	5.20	-
Absorbable K (ppm) پتاسیم قابل جذب	340.00	-
Soil ware in wilting point (%) آب خاک در نقطه پژمردگی دائم	20.50	22.50
Soil ware in field capacity (%) آب خاک در حد ظرفیت زراعی	32.50	35.50
Soil ware in saturation point (%) محتوای آب خاک در نقطه اشباع	49.00	49.50
Saturated hydraulic (cm hr^{-1}) conductivity هدایت هیدرولیکی اشباع	0.41	0.29
Bulk density (g cm^{-3}) وزن مخصوص ظاهری	1.42	1.45

نتایج و بحث

روز از کاشت تا گلدهی

در شرایط مبنا طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی ارقام Simon ،SC704 و BC678 به‌ترتیب ۸۰، ۷۶ و ۷۶ روز بود (جدول ۲) که صرف‌نظر از تاریخ کاشت، در شرایط تغییر اقلیم دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) طبق سناریوی RCP4.5، به‌ترتیب با ۴/۸۱، ۵/۲۸ و ۵/۲۸ درصد کاهش به ۷۶/۲، ۷۲ و ۷۲ روز رسید (شکل ۱). کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی در سناریوی RCP8.5 نسبت به RCP4.5 شدیدتر بود، به طوری که این مرحله نموی در ارقام مورد بررسی به‌ترتیب با ۵/۶۷، ۶/۴۰ و ۶/۴۰ درصد کاهش نسبت به شرایط مبنا به ۷۵/۵، ۷۱/۱ و ۷۱/۱ روز خواهد رسید. همچنین میزان کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی در دوره تغییر اقلیم دور (۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰) در مقایسه با دوره تغییر اقلیم نزدیک (۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰) شدیدتر پیش‌بینی شد (شکل ۱). طبق پیش‌بینی‌های مدل CERES-Maize صرف‌نظر از ارقام مورد بررسی، با تغییر تاریخ کاشت طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی، تحت تاثیر هر دو سناریوی تغییر اقلیم قرار گرفت (شکل ۱). در دوره اقلیمی نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱)، طولانی‌ترین طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی ارقام Simon ،SC704 و BC678 در هر دو سناریوی مربوط به زودترین تاریخ کاشت (۲۶ فروردین) بود که به‌ترتیب ۸۹/۵، ۸۵/۲ و ۸۵/۲ روز برای سناریوی RCP4.5 و ۸۸/۵، ۸۴/۴ و ۸۴/۴ روز برای سناریوی RCP8.5 پیش‌بینی شد. کوتاه‌ترین طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی در ارقام مذکور نیز به‌ترتیب ۷۲/۹، ۶۵/۵ و ۶۵/۵ روز برای سناریو RCP4.5 و ۷۲/۲، ۶۵/۵ و ۶۵/۵ برای سناریو RCP8.5 در دیرترین تاریخ کاشت (۴ خرداد) شبیه‌سازی شد (شکل ۱).

جدول ۲- مراحل نمو فنولوژیک و عملکرد ارقام ذرت در دوره مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) و تاریخ کاشت مرسوم (۱۵ اردیبهشت)

Table 2- Phenological development stages and yield of maize cultivars in the baseline period (1981-2010) and common sowing date (May 5)

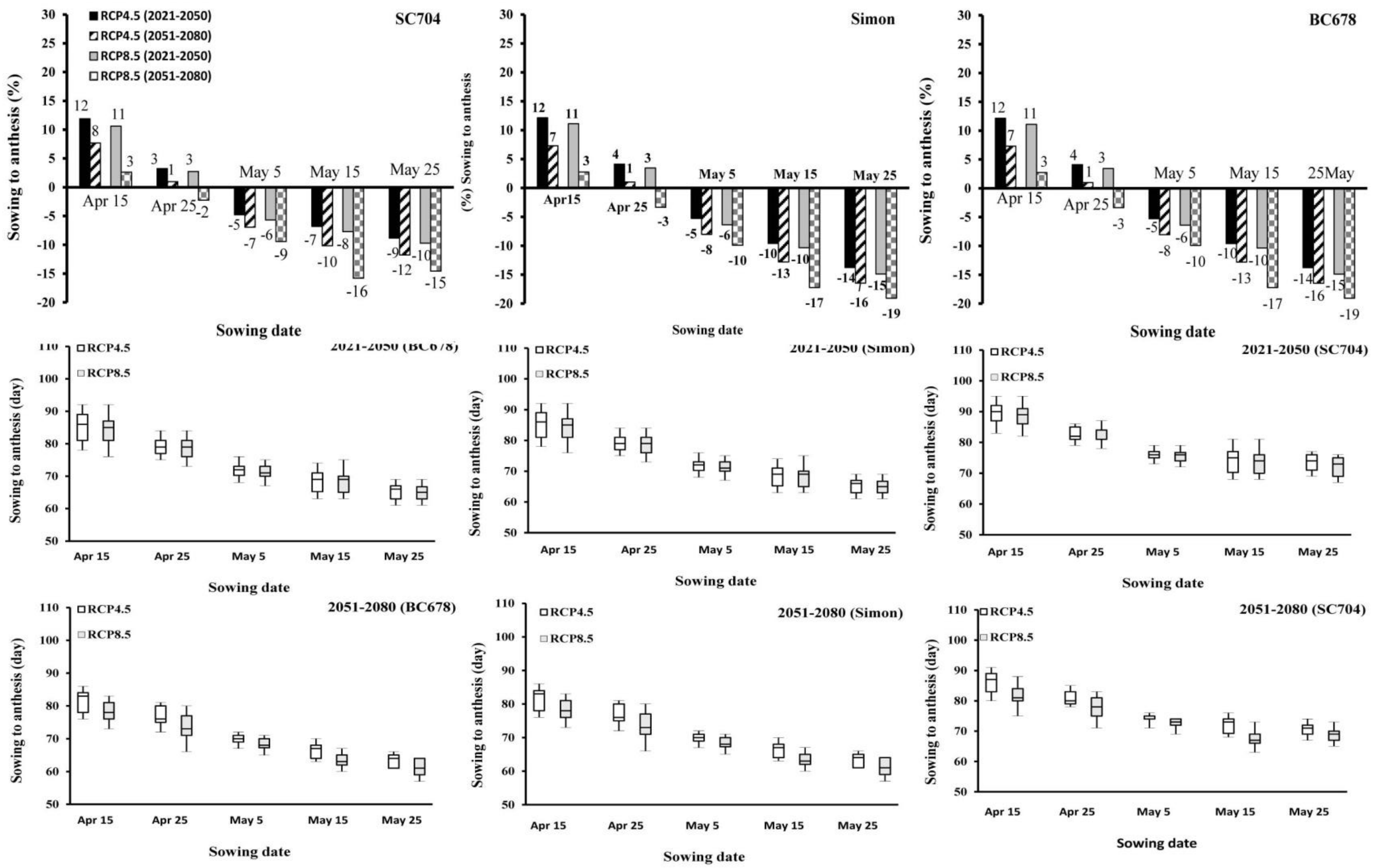
	SC704	Simon	BC678
روز از کاشت تا گلدهی Days from sowing to anthesis	80	76	76
روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک Days from sowing to physiological maturity	130	128	128
وزن خشک کل (کیلوگرم در هکتار) Total dry weight (kg ha^{-1})	22817	22604	20478
عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield (kg ha^{-1})	9842	10266	8141

در دوره تغییر اقلیم آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) نیز صرف‌نظر از تاریخ کاشت، طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی ارقام SC704، Simon و BC678 در سناریو RCP4.5 به‌ترتیب ۶/۹۶، ۸/۰۴ و ۸/۰۴ درصد و در سناریو RCP8.5 به‌ترتیب ۹/۴۳، ۹/۹۱ و ۹/۹۱ درصد نسبت به شرایط مبنا کاهش می‌یابد. در هر دو سناریو طولانی‌ترین طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی برای تاریخ کاشت ۲۶ فروردین و کوتاه‌ترین آن برای تاریخ کاشت ۴ خرداد شبیه‌سازی شد (شکل ۱). به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی‌های مدل CERES-Maize نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم با تغییر تاریخ کاشت طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی نیز تغییر خواهد کرد، به طوری که طول این دوره نموی در هر سه رقم در تاریخ‌های کاشت زودهنگام (۲۶ فروردین و ۵ اردیبهشت) نسبت به شرایط مبنا افزایش خواهد یافت اما در تاریخ کاشت رایج (۱۵ اردیبهشت) و تاریخ‌های کاشت دیرهنگام (۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) کاهش خواهد یافت. طبق شرایط سناریوی RCP4.5 بیشترین کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی مربوط به ارقام Simon و BC678 در تاریخ کاشت ۴ خرداد به میزان ۱۴ درصد برای دوره تغییر اقلیم نزدیک و به میزان ۱۶ درصد برای دوره تغییر اقلیم دور پیش‌بینی شد (شکل ۱). میزان کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی برای ارقام Simon و BC678 در تاریخ کاشت ۴ خرداد بر اساس سناریوی RCP8.5 شدیدتر بود. همچنین در تاریخ کاشت رایج و دیرهنگام و سناریو های مورد بررسی طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی رقم SC704 کاهش کمتری در دوره‌های تغییر اقلیمی نشان داد.

به نظر می‌رسد که افزایش درجه حرارت ناشی از شرایط تغییر اقلیم پیش رو در طول دوره رشد ارقام مورد بررسی منجر به تامین زودتر نیاز حرارتی مورد نیاز برای طی شدن مراحل نمو فنولوژیک و در نتیجه افزایش سرعت نمو خواهد شد، که این موضوع باعث کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی در تاریخ کاشت رایج و دیرهنگام شد (شکل ۱). مزا و همکاران (Meza, Silva, & Vigil, 2008) گزارش کردند که افزایش دما در محدوده ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی گراد باعث تسریع مراحل فنولوژیکی ذرت می‌شود اما در دمای بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد سرعت نمو کاهش یافته و باعث اختلال در رشد ذرت می‌شود. نتایج شبیه‌سازی شیری (Shiri, 2018) نشان داد که تعداد روز از کاشت تا گلدهی ذرت در منطقه مغان تحت تأثیر تغییرات اقلیمی پیش‌رو نسبت به شرایط مبنا (۲۰۱۴-۱۹۸۵) در هر دو سناریو (A2 و A1B) کاهش یافت، به طوری که در سال ۲۰۸۵، طبق سناریو A2 با ۴۶ روز کمترین تعداد روز تا گلدهی پیش‌بینی شد. بولینگ و همکاران (Bowling *et al.*, 2018) نشان دادند که افزایش دما از طریق افزایش تنفس موفقیت و زمان گرده‌افشانی ذرت را تحت تأثیر قرار داد.

روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک

بر اساس پیش‌بینی‌های مدل CERES-Maize طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای ارقام SC704، Simon و BC678 در شرایط مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) به‌ترتیب ۱۳۰، ۱۲۸ و ۱۲۸ روز بود (جدول ۲) که در شرایط تغییر اقلیم دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) طبق سناریوی RCP4.5 با ۴/۰، ۴/۲ و ۴/۲ درصد کاهش به‌ترتیب به حدود ۱۲۴/۸، ۱۲۲/۶ و ۱۲۲/۶ روز خواهد رسید (شکل ۲). دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط سناریوی RCP8.5 در مقایسه با RCP4.5 کاهش بیشتری از خود نشان داد، به طوری که در ارقام SC704، Simon و BC678 به‌ترتیب ۵/۲۰، ۵/۴۹ و ۵/۴۹ درصد کاهش نسبت به شرایط مبنا اتفاق افتاد. همچنین میزان کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در دوره تغییر اقلیم دور (۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰) در مقایسه با دوره تغییر اقلیم نزدیک (۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰) شدیدتر پیش‌بینی شد (شکل ۲).



شکل ۱- تغییرات تعداد روز از کاشت تا گرده‌افشانی در تاریخ‌های مختلف کاشت برای شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره مبنا (ردیف اول)، نمودار جعبه‌ای تعداد روز از کاشت تا گرده‌افشانی در تاریخ‌های مختلف کاشت (ردیف دوم و سوم). خط افقی وسط هر جعبه میانه (چارک دوم)، مستطیل‌های پایین و بالا به‌ترتیب چارک‌های اول و سوم، خطوط افقی پایین و بالا در خارج هر جعبه به‌ترتیب حداقل و حداکثر داده‌ها را نشان می‌دهند.

Figure 1- Changes in number of day from sowing to anthesis in different sowing dates for climate change conditions compared to baseline (first row), box plot for number of day from sowing to anthesis in different sowing dates (second and third rows). The horizontal line in the middle of each box is median (second quartile), the lower and upper rectangles indicate first and third quartiles, respectively, and the lower and upper horizontal lines outside each box represent minimum and maximum data, respectively.

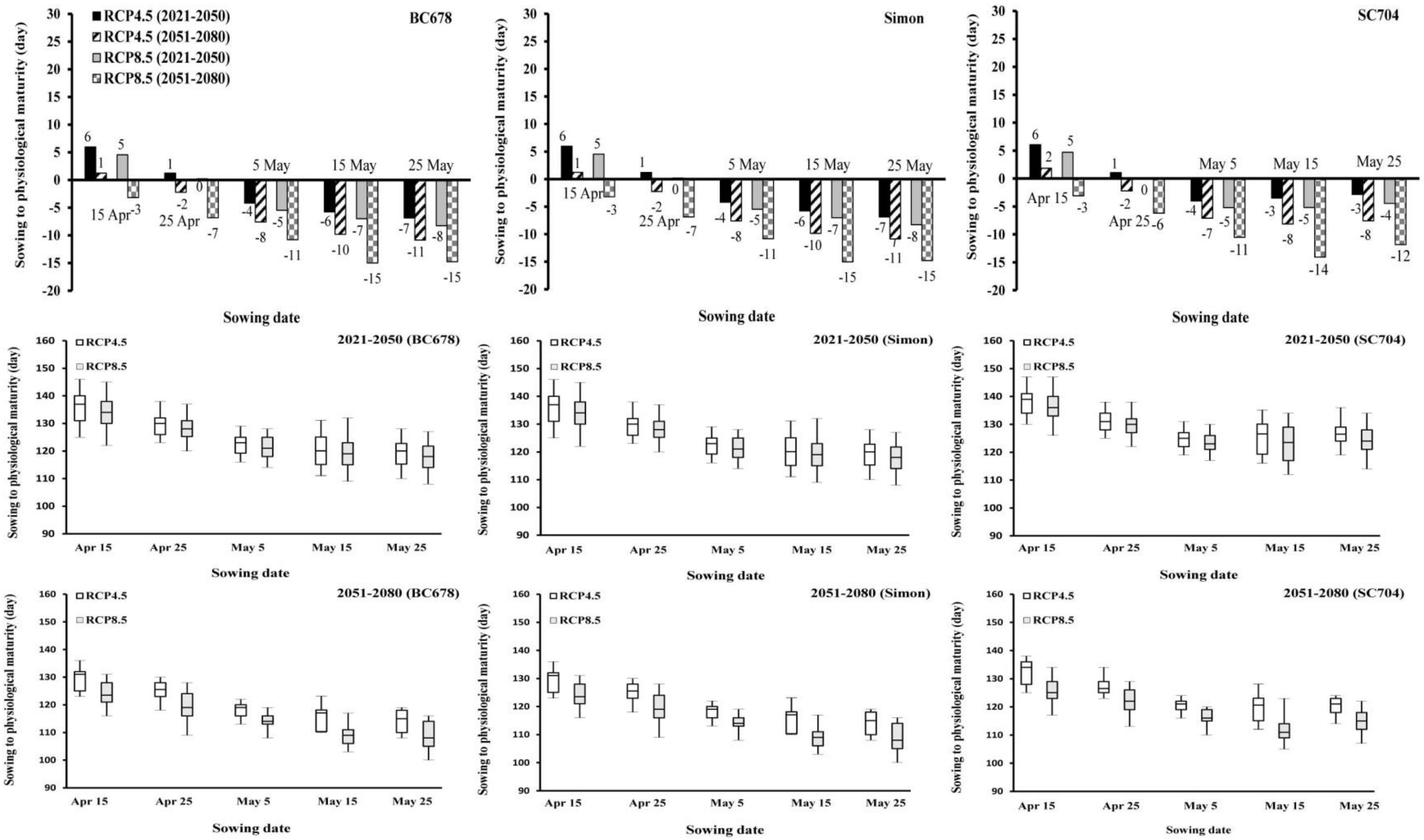
نتایج این بررسی همچنین نشان داد که با تغییر تاریخ کاشت طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، صرف‌نظر از ارقام مورد بررسی، تحت تاثیر هر دو سناریو تغییر اقلیم قرار گرفت. طولانی‌ترین طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام SC704، Simon و BC678 در هر دو سناریو مربوط به زودترین تاریخ کاشت و کوتاه‌ترین آن مربوط به دیرترین تاریخ کاشت بود. طبق پیش‌بینی‌های مدل CERES-Maize در دوره اقلیمی نزدیک، رقم SC704 در تاریخ کاشت ۲۶ فروردین تحت سناریوی مورد بررسی دارای بیشترین طول دوره روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بود و کمترین آن برای ارقام Simon و BC678 مشاهده شد (شکل ۲).

مشابه با دوره آینده نزدیک در دوره آینده دور نیز (۲۰۸۰-۲۰۵۱) طول دوره روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت تحت تغییرات آب و هوایی قرار خواهد گرفت، اما شدت این تأثیرات در آینده دور بیشتر از آینده نزدیک خواهد بود. طول دوره روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام SC704، Simon و BC678 در سناریوی RCP4.5 به‌ترتیب ۷، ۷/۶۰ و ۷/۶۰ درصد و در سناریوی RCP8.5 به‌ترتیب ۱۰/۵۰، ۱۰/۸۱ و ۱۰/۸۱ درصد نسبت به شرایط مبنا کاهش می‌یابد (شکل ۲). در سناریوی RCP4.5 بیشترین طول دوره روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در رقم SC704 در تاریخ کاشت ۲۶ فروردین به میزان ۱۳۲/۴ روز و کمترین آن در ارقام Simon و BC678 در تاریخ کاشت ۴ خرداد به میزان ۱۰۹/۱ روز در سناریوی RCP8.5 رخ داد (شکل ۲). به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی‌های مدل CERES-Maize نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم با تغییر تاریخ کاشت طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک نیز تغییر خواهد کرد، به طوری که طول این دوره نموی در هر سه رقم در تاریخ‌های کاشت زودهنگام (۲۶ فروردین و ۵ اردیبهشت) نسبت به شرایط مبنا افزایش خواهد یافت اما در تاریخ کاشت رایج (۱۵ اردیبهشت) و تاریخ‌های کاشت دیرهنگام (۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) کاهش خواهد یافت. طبق شرایط سناریوی RCP4.5 بیشترین کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به ارقام Simon و BC678 در تاریخ کاشت ۴ خرداد به میزان ۷ درصد برای دوره تغییر اقلیم نزدیک و به میزان ۱۱ درصد برای دوره تغییر اقلیم دور پیش‌بینی شد. میزان کاهش طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای ارقام Simon و BC678 در تاریخ کاشت ۴ خرداد بر اساس سناریوی RCP8.5 شدیدتر بود. همچنین در تاریخ کاشت رایج و دیرهنگام و سناریوهای مورد بررسی طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک رقم SC704 کاهش کمتری در دوره‌های تغییر اقلیمی نشان داد (شکل ۲). به نظر می‌رسد دلیل اصلی این امر افزایش میانگین دما در تاریخ‌های کاشت دیرهنگام باشد. در مطالعه‌ای دیگر در کشور سریلانکا، طول دوره رشد برنج (Oryza *sativa*) در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۴۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۶۰) طبق سناریو RCP8.5 از ۱۰۹ روز به ۱۰۷ روز کاهش پیدا کرد (Dias, Navaratne, Weerasinghe, & Hettiarachchi, 2016). نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که افزایش دما منجر به بلوغ فیزیوژیکی سریع گیاه می‌شود. در بررسی‌ای که در کشور آمریکا انجام شده بود، مشخص گردید که طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۶۹-۲۰۴۰) طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب ۹ و ۱۸ درصد نسبت به شرایط مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) کاهش یافت (Araya *et al*., 2017).

وزن خشک کل

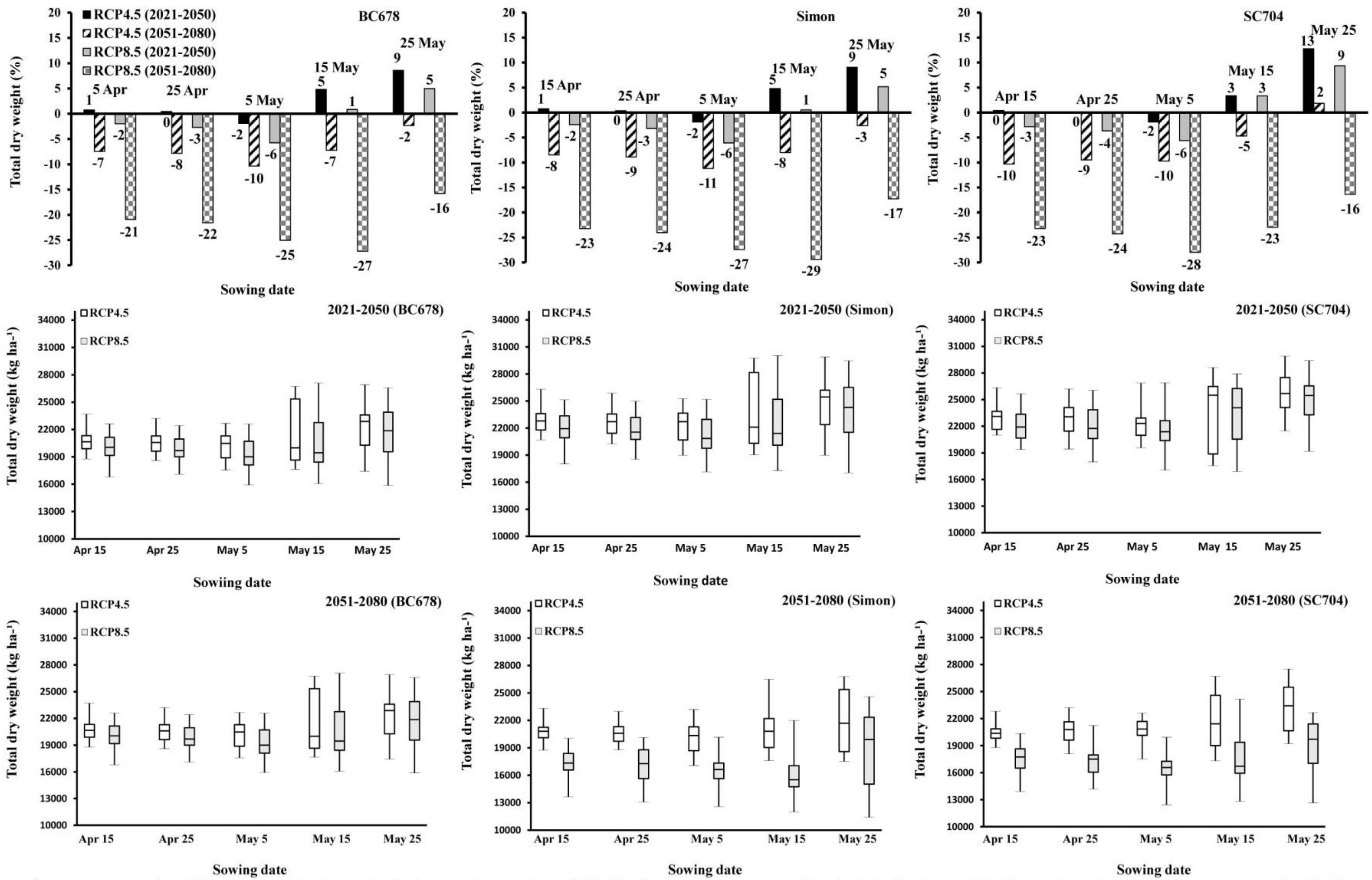
وزن خشک کل ذرت در شرایط اقلیمی آینده نسبت به شرایط مبنا کاهش پیدا خواهد کرد. در شرایط مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) وزن خشک کل برای ارقام SC704، Simon و BC678 به‌ترتیب ۲۲۸۱۷، ۲۲۶۰۴ و ۲۰۴۷۸ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۲). وزن خشک کل ارقام مذکور در شرایط تغییر اقلیم دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱)، طبق سناریو RCP4.5 به‌ترتیب با ۱/۸۸، ۱/۸۹ و ۱/۹۰ درصد کاهش به ۲۲۳۸۷، ۲۲۱۷۸ و ۲۰۰۹۰ کیلوگرم در هکتار و طبق سناریو RCP8.5 به‌ترتیب با ۵/۶۲، ۶/۰۰ و ۵/۷۶ درصد کاهش به ۲۱۵۳۶، ۲۱۲۲۸ و ۱۹۲۹۹ کیلوگرم در هکتار خواهد رسید (شکل ۳). نتایج پیش‌بینی‌های مدل CERES-Maize نشان داد که با تأخیر در کاشت وزن خشک کل ذرت افزایش خواهد یافت، به طوری که در هر دو سناریو کمترین وزن خشک کل برای ارقام SC704، Simon و BC678 در تاریخ کاشت ۵ اردیبهشت به‌دست آمد (به‌ترتیب ۲۲۸۳۰، ۲۲۶۸۱ و ۲۰۵۶۸ کیلوگرم در هکتار در سناریو RCP4.5 و ۲۱۹۸۲، ۲۱۸۸۶ و ۱۹۹۲۳ کیلوگرم در هکتار در سناریو RCP8.5). بیشترین مقدار وزن خشک کل برای ارقام مذکور در دیرترین تاریخ کاشت (۴ خرداد) شبیه‌سازی شد (به‌ترتیب ۲۵۷۲۷، ۲۴۶۵۳ و ۲۲۲۳۸ کیلوگرم در هکتار در سناریو RCP4.5 و ۲۱۹۸۲، ۲۱۸۸۶ و ۱۹۹۲۳ کیلوگرم در هکتار در سناریو RCP8.5).

وزن خشک کل در دوره آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) نیز نسبت به شرایط مبنا کاهش پیدا خواهد کرد، به طوری که میزان وزن خشک کل ارقام SC704، Simon و BC678 نسبت به شرایط مبنا در سناریو RCP4.5 به‌ترتیب ۹/۷۱، ۱۱/۲۰ و ۱۰/۳۶ درصد و در سناریو RCP8.5 به‌ترتیب ۲۷/۹۶، ۲۷/۴۲ و ۲۵ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۳).



شکل ۲- تغییرات تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در تاریخ‌های مختلف کاشت برای شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره مبنا (ردیف اول)، نمودار جعبه‌ای تعداد روز از کاشت تا رسیدن فیزیولوژیک در تاریخ‌های مختلف کاشت (ردیف دوم و سوم). خط افقی وسط هر جعبه میانه (چارک دوم)، مستطیل‌های پایین و بالا به‌ترتیب چارک‌های اول و سوم، خطوط افقی پایین و بالا در خارج هر جعبه به‌ترتیب حداقل و حداکثر داده‌ها را نشان می‌دهند.

Figure 2- Changes in number of day from sowing to physiological maturity in different sowing dates for climate change conditions compared to baseline (first row), box plot for number of day from sowing to physiological maturity in different sowing dates (second and third rows). The horizontal line in the middle of each box is median (second quartile), the lower and upper rectangles indicate first and third quartiles, respectively, and the lower and upper horizontal lines outside each box represent minimum and maximum data, respectively.



شکل ۳- تغییرات وزن خشک کل در تاریخ‌های مختلف کاشت برای شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره مبنا (ردیف اول)، نمودار جعبه‌ای وزن خشک کل در تاریخ‌های مختلف کاشت (ردیف دوم و سوم). خط افقی وسط هر جعبه میانه (چارک دوم)، مستطیل‌های پایین و بالا به‌ترتیب چارک‌های اول و سوم، خطوط افقی پایین و بالا در خارج هر جعبه به‌ترتیب حداقل و حداکثر داده‌ها را نشان می‌دهند.

Figure 3- Changes in total dry weight in different sowing dates for climate change conditions compared to baseline (first row), box plot for total dry weight in different sowing dates (second and third rows). The horizontal line in the middle of each box is median (second quartile), the lower and upper rectangles indicate first and third quartiles, respectively, and the lower and upper horizontal lines outside each box represent minimum and maximum data, respectively.

طبق شرایط سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده دور بیشترین وزن خشک کل با کاشت رقم SC704 در تاریخ ۴ خرداد مشاهده شد و کمترین وزن خشک کل با کاشت رقم BC678 در تاریخ ۵ اردیبهشت در سناریو RCP8.5 به‌دست خواهد آمد. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی نشان داد وزن خشک کل ارقام ذرت نسبت به شرایط مبنا کاهش می‌یابد. در هر دو سناریو و هر دو دوره اقلیمی، تأخیر در کاشت وزن خشک کل ذرت را افزایش خواهد داد، به طوری که بیشترین وزن خشک کل در هر دو سناریو در تاریخ کاشت ۴ خرداد و کمترین آن در تاریخ‌های کاشت ۵ اردیبهشت و ۲۵ اردیبهشت شبیه‌سازی شد. به عبارت دیگر کشت زودتر ذرت میزان وزن خشک کل این گیاه را کاهش می‌دهد و تأخیر در کاشت وزن خشک کل را افزایش می‌دهد. بیشترین وزن خشک در هر دو سناریو در رقم SC704 در تاریخ ۴ خرداد و کمترین وزن خشک کل در رقم BC678 در تاریخ‌های کاشت ۵ و ۲۵ اردیبهشت پیش‌بینی شد.

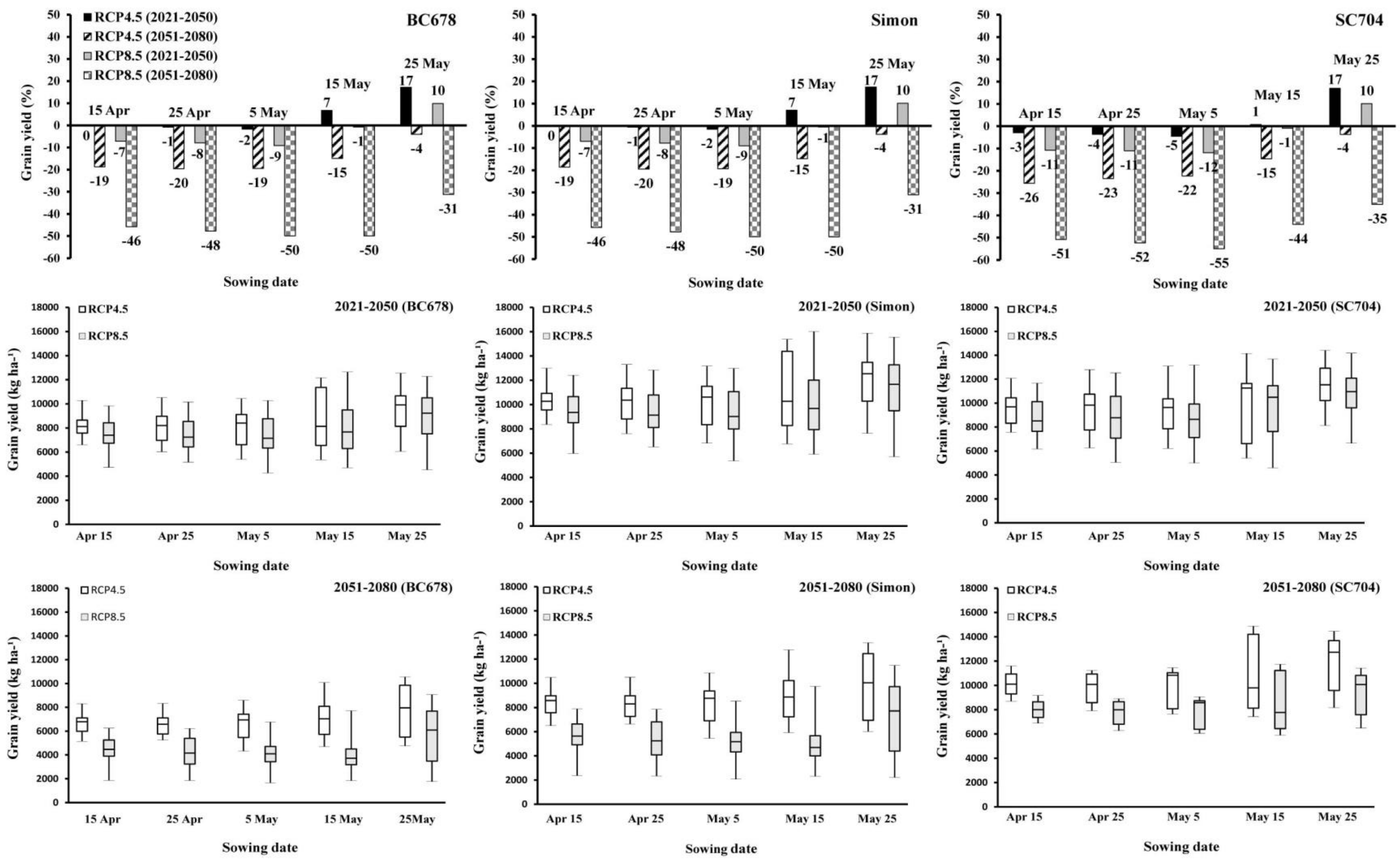
در آزمایشی دیگر میزان وزن خشک کل ذرت در کانزاز آمریکا طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب ۱۳ و ۲۷ درصد کاهش یافت (Araya *et al.*, 2017). با کاهش طول دوره نمو فنولوژیک مدت زمان برای دریافت تابش خورشیدی و جذب دی‌اکسید کربن توسط محصول کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش وزن خشک کل می‌شود. مطالعات رضایی و همکاران (Rezaei, Webber, Gaiser, Naab, & Ewert, 2015) نشان داد به دلیل افزایش دما سرعت رشد محصول افزایش می‌یابد که به نوبه خود منجر به کاهش طول دوره رشد و کاهش وزن خشک کل می‌شود. نتایج این بررسی نشان داد که اگرچه در شرایط تغییر اقلیم آینده در تاریخ کاشت رایج منطقه (۱۵ اردیبهشت) افزایش درجه حرارت ناشی از افزایش اثرات گازهای گلخانه‌ای منجر به افزایش سرعت نمو و در نتیجه کاهش طول دوره نمو و عملکرد وزن خشک کل ارقام ذرت در مقایسه با شرایط فعلی خواهد شد، اما در تاریخ کاشت‌های دیرهنگام در مقایسه با تاریخ کاشت رایج و زودهنگام وزن خشک کل افزایش یافت. به نظر می‌رسد علت این موضوع تغییرات رخ داده در درجه حرارت‌های حداقل و حداکثر روزانه باشد. زیرا با توجه به بررسی نتایج خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی در شرایط تغییر اقلیم آینده منطقه مورد ارزیابی، درجه حرارت‌های حداکثر در طول دوره رشد ذرت در مقایسه با درجه حرارت‌های حداقل روزانه تغییرات چندانی نخواهند داشت (نتایج نشان داده نشده است). به نظر می‌رسد با توجه به این نکته که ذرت دارای گذرگاه فتوسنتزی ۴ کربنه بوده و این گذرگاه در دماهای بالاتر مطلوب‌تر از دماهای پایین‌تر عمل می‌کند، افزایش دماهای حداقل روزانه رشد منجر به بهبود کارایی فتوسنتزی گیاه و در نتیجه افزایش وزن خشک کل گیاه خواهد شد.

در آزمایش سارکر و همکاران (Sarker *et al.*, 2016) در کشور غنا وزن خشک کل ذرت در سال ۲۰۳۰ طبق سناریوهای RCP8.5 با میانگین ۱۵۴۴/۵ کیلوگرم در هکتار نسبت به شرایط مبنا ۵۹ درصد افزایش یافت. در مطالعه آن‌ها افزایش وزن خشک کل ذرت از ۱۶۹/۹ کیلوگرم در هکتار تحت سناریو RCP8.5 برای دوره زمانی ۲۰۸۰ تا ۲۳۸۶/۱ کیلوگرم در هکتار تحت سناریوهای RCP8.5 برای دوره زمانی ۲۰۳۰ متغیر بود. با این‌حال در پژوهش آموزو و همکاران (Amouzou *et al.*, 2019) در غرب آفریقا وزن خشک کل ذرت در افق زمانی ۲۰۹۹–۲۰۸۰ تحت سناریوهای RCP4.5 (۱۵–۱۳ درصد) و RCP8.5 (۲۹–۲۵ درصد) نسبت به شرایط مبنا (۲۰۰۵–۱۹۸۶) کاهش یافت.

عملکرد دانه

عملکرد دانه ارقام SC704، Simon و BC678 در سال‌های ۲۰۱۰–۱۹۸۱ (شرایط مبنا) به‌ترتیب ۹۸۴۲، ۱۰۲۶۶ و ۸۱۴۱ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۲). نتایج شبیه‌سازی‌های مدل CERES-Maize نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم دوره آینده نزدیک طبق سناریوهای RCP4.5 در تاریخ کاشت ۱۵ اردیبهشت عملکرد دانه ارقام SC704، Simon و BC678 به‌ترتیب با ۴/۵۶، ۱/۵۶ و ۱/۷۱ درصد کاهش نسبت به شرایط مبنا به ۹۳۹۳، ۱۰۱۰۶ و ۸۰۰۲ کیلوگرم در هکتار و طبق سناریوهای RCP8.5 به‌ترتیب با ۱۱/۹۵، ۹/۰۰ و ۹/۱۳ درصد کاهش به ۸۶۶۶، ۹۳۴۰ و ۷۳۹۷ کیلوگرم در هکتار خواهد رسید (شکل ۴). در شرایط تغییر اقلیم، تغییر تاریخ کاشت ذرت منجر به تغییر عملکرد دانه خواهد شد، به گونه‌ای که در دوره تغییر اقلیم نزدیک، بیشترین عملکرد دانه برای ارقام مورد بررسی در دیرترین تاریخ کاشت ۴ خرداد با ۱۷ درصد افزایش (به‌ترتیب ۱۱۵۱۸، ۱۲۰۶۰ و ۹۵۴۰ کیلوگرم در هکتار) در سناریوهای RCP4.5 و ۱۰ درصد افزایش در سناریوهای RCP8.5 (به‌ترتیب ۱۰۸۳۶، ۱۱۳۰۷ و ۸۹۴۷ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد. کمترین عملکرد دانه نیز در تاریخ کاشت ۵ اردیبهشت شبیه‌سازی شد (شکل ۴). در هر دو سناریو بیشترین عملکرد دانه در رقم Simon در تاریخ کاشت ۴ خرداد و کمترین میزان آن در رقم BC678 در تاریخ کاشت ۵ اردیبهشت پیش‌بینی شد.

در دوره آینده دور (۲۰۸۰–۲۰۵۱) نیز عملکرد دانه ذرت نسبت به شرایط مبنا کاهش یافت. اما کاهش در دوره آینده دور نسبت به دوره آینده نزدیک بیشتر بود و همچنین درصد کاهش در سناریو RCP8.5 بیشتر از سناریو RCP4.5 بود، به طوری که عملکرد دانه ارقام SC704، Simon و BC678 نسبت به شرایط مبنا در سناریو RCP4.5 به‌ترتیب، ۲۲/۳۱، ۱۹/۴۳ و ۱۹/۴۰ درصد و در سناریو RCP8.5 به‌ترتیب ۵۴/۹۹، ۴۹/۹۷ و ۴۹/۹۲ درصد کاهش خواهد یافت (شکل ۴).



شکل ٤- تغییرات عملکرد دانه در تاریخ‌های مختلف کاشت برای شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره مبنا (ردیف اول)، نمودار جعبه‌ای عملکرد دانه در تاریخ‌های مختلف کاشت (ردیف دوم و سوم). خط افقی وسط هر جعبه میانه (چارک دوم)، مستطیل‌های پایین و بالا به‌ترتیب چارک‌های اول و سوم، خطوط افقی پایین و بالا در خارج هر جعبه به‌ترتیب حداقل و حداکثر داده‌ها را نشان می‌دهند.

Figure 4- Changes in grain yield in different sowing dates for climate change conditions compared to baseline (first row), box plot for grain yield in different sowing dates (second and third rows). The horizontal line in the middle of each box is median (second quartile), the lower and upper rectangles indicate first and third quartiles, respectively, and the lower and upper horizontal lines outside each box represent minimum and maximum data, respectively.

مشابه با دوره آینده نزدیک، در دوره آینده دور نیز تغییر در تاریخ کاشت منجر به تغییر عملکرد دانه ذرت شد، به طوری که بیشترین عملکرد دانه ارقام ذرت در هر دو سناریو در رقم Simon با دیرترین تاریخ کاشت (۴ خرداد) شبیه‌سازی شد و کمترین آن در رقم BC678 و تاریخ‌های کاشت ۵ اردیبهشت و ۲۵ اردیبهشت پیش‌بینی شد. اما همان‌گونه که نتایج مربوط به عملکرد دانه ذرت در دوره تغییر اقلیم دور نشان می‌دهد، اگرچه تغییر در تاریخ کاشت منجر به تغییر عملکرد دانه شد اما نتوانست منجر به جبران کاهش خسارت در مقایسه با شرایط مبنا شود. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی نشان داد عملکرد دانه هر سه رقم، در دوره آینده نزدیک نسبت به شرایط مبنا درطول دوره رشد ذرت کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که در هر دو سناریو و هر دو دوره، تأخیر در کاشت میزان عملکرد دانه ذرت را افزایش و کاشت زودتر (۵ و ۲۵ اردیبهشت) میزان عملکرد دانه را کاهش خواهد داد. بیشترین میزان عملکرد دانه در هر دو سناریو در تاریخ کاشت ۴ خرداد و کمترین آن در تاریخ‌های ۵ و ۲۵ اردیبهشت شبیه‌سازی شد.

به‌عبارت دیگر کشت زودتر ذرت عملکرد این گیاه را کاهش می‌دهد و تأخیر در کاشت میزان عملکرد را افزایش می‌دهد. بیشترین و کمترین عملکرد به‌ترتیب در ارقام Simon و BC678 در تاریخ‌های کاشت ۴ خرداد و ۵ و ۲۵ اردیبهشت مشاهده شد (شکل ۴). تغییرات در عملکرد دانه می‌تواند بسته به میانگین دما در طول فصل رشد ذرت متفاوت باشد، به طوری که تحت شرایط تغییر اقلیم از طریق افزایش درجه حرارت و محدود شدن طول فصل رشد می‌تواند در مناطق گرم منجر به اثرات منفی و در مناطق خنک، افزایش درجه حرارت منجر به بهبود شرایط دمایی برای رشد گیاه زراعی شود (Meza *et al.*, 2008). سریواستوا و همکاران (Srivastava, Mboh, Zhao, Gaiser, & Ewert, 2018) گزارش کردند افزایش عملکرد ذرت در غنا به علت افزایش دی‌اکسید کربن و عدم تغییر در بارندگی و افزایش تشعشع در طی فصل رشد بود.

تغییرات آب و هوایی میزان بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی را در اکثر مناطق کاهش می‌دهد (Wheeler & Vonbraun, 2013). آمنهوفر و همکاران (Ummenhofer *et al.*, 2015) گزارش کردند که عملکرد ذرت در غرب آمریکا طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد، آرایا و همکاران (Araya *et al.*, 2017) گزارش کردند که عملکرد ذرت در غرب آمریکا طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۶۹-۲۰۴۰، ۴ درصد افزایش و در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰، ۶/۳ درصد کاهش می‌یابد. اسلاما و همکاران (Islama *et al.*, 2012) گزارش کردند که میزان عملکرد ذرت برای دهه ۲۰۵۰ در کلرادو آمریکا طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب ۱۷ و ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد افزایش عملکرد رقم Simon در دیرترین تاریخ کشت در سناریوهای تغییر اقلیم آینده ناشی از اثرات مفید دی‌اکسید کربن بر کارآیی مصرف تشعشع، کارایی مصرف آب و کاهش تعرق سطح برگ باشد. افزایش عملکرد ذرت در سطوح بالای دی‌اکسید کربن توسط درینگ و همکاران (Deryng *et al.*, 2016) گزارش شده است. ذرت در مقایسه با سایر غلات می‌تواند در دماهای بالا رشد کند، بنابراین محصول مناسبی برای شرایط گرم‌تر است اما نسبت به تنش آبی حساس است (Doorenbos & Kassam, 1979). عملکرد ذرت ممکن است با افزایش راندمان استفاده از تابش خورشیدی در غلظت‌های بالای دی‌اکسید کربن افزایش یابد و همچنین اثر مثبت دی‌اکسید کربن بالا روی عملکرد محصولات چهار کربنه به دلیل تحریک فتوسنتز توسط سریواستوا و همکاران (Srivastava *et al.*, 2018) نیز گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با شرایط مبنا ویژگی‌های مورد بررسی ذرت کاهش یافت. کاهش طول دوره‌های نمویی، وزن خشک کل و عملکرد دانه در دوره تغییر اقلیم آینده دور شدیدتر از دوره آینده نزدیک و در سناریو RCP8.5 شدیدتر از سناریو RCP4.5 بود. در رابطه با اثر تاریخ کاشت، در هر دو دوره اقلیمی آینده و طبق هر دو سناریو با کاشت ارقام مورد بررسی در تاریخ‌های دیرهنگام (۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) در مقایسه با تاریخ‌های زودهنگام (۲۶ فروردین و ۵ اردیبهشت) و رایج (۱۵ اردیبهشت) طول دوره مراحل نمویی کوتاه‌تر، وزن خشک کل و عملکرد دانه بیشتر بود. در بین ارقام مورد بررسی نیز در هر دو دوره اقلیمی آینده و هر دو سناریو، رقم Simon بیشترین عملکرد دانه را داشت. بیشترین طول دوره مراحل نمویی و وزن خشک کل نیز متعلق به رقم SC704 بود. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در صورت وقوع هر یک از سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های آینده نزدیک و دور کاشت رقم Simon در تاریخ‌های دیرهنگام (۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) که بیشترین عملکرد دانه را تولید خواهد کرد به‌عنوان راهکار مدیریتی مناسب برای مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم آینده بر تولید ذرت دانه‌ای پیشنهاد می‌گردد.

References

1. Ainsworth, E. A., & Ort, D. R. (2010). How do we improve crop production in a warming world? *Plant Physiology*, *154*(2), 526-530. https://doi.org/10.1104/pp.110.161349
2. Alexandrov, V. A., & Hoogenboom, G. (2000). The impact of climate variability and change crop yield in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology*, *104*(4), 315-327. https://doi.org/10.1016/s0168-1923(00)00166-0
3. Amouzou, K. A., Lamers, J. P., Naab, J. B., Borgemeister, C., Vlek, P., & Land Becker, M. (2019). Climate change impact on water-and nitrogen-use efficiencies and yields of maize and sorghum in the northern Benin dry savanna, West Africa. *Field Crops Research*, *235*, 104-117. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.021
4. Araya, A., Kisekka, I., Lin, X., Prasad, P. V., Gowda, P. H., Rice, C., & Andales, A. (2017). Evaluating the impact of future climate change on irrigated maize production in Kansas. *Climate Risk Management*, *17*, 139-154. https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.08.001
5. Bowling, L. C. M., Widhalm, M., Cherkauer, K. A., Beckerman, J., Brouder, S., Buzan, J., Doering, O., Dukes, J., Ebner, P., & Frankenburger, J. (2018). Indiana's Agriculture in a Changing Climate: A Report from the Indiana Climate Change Impacts Assessment. *Agriculture Reports.* https://doi.org/10.5703/1288284316778
6. Cairns, J. E., Crossa, J., Zaidi, P. H., Grudloyma, P., Sanchez, C., Araus, J. L., Thaitad, S., Makumbi, D., Magorokosho, C., Bänziger, M., & Menkir, A. (2013). Identification of drought, heat, and combined drought and heat tolerant donors in maize. *Crop Science*, *53*(4), 1335-1346. https://doi.org/10.2135/cropsci2012.09.0545
7. Crafts-Brander, S. J., & Salvucci, M. E. (2002). Sensitivity of photosynthesis in a C_4 plant, maize to heat stress. *Plant Physiology*, *129*(4), 1773-1780. https://doi.org/10.1104/pp.002170
8. Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C., Müller, C., Pugh, T. A. M., & Boote, K. J. (2016). Regional disparities in the beneficial effects of rising CO_2 concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change*, *6*(8), 786-790. https://doi.org/10.1038/nclimate2995
9. Dias, M. P. N. M., Navaratne, C. M., Weerasinghe, K. D. N., & Hettiarachchi, R. H. A. N. (2016). Application of DSSAT crop simulation model to identify the changes of rice growth and yield in Nilwala river basin for mid-centuries under changing climatic conditions. *Procedia food science*, *6*, 159-163. https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.039
10. Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Yield Response to Water*. FAO. Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO, Rome, Italy.
11. Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, *10*, 4-10. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001
12. Hay, R. K. M., & Walker, A. J. (1989). *An Introduction to the Physiology of Crop Yield*. Longman Scientific and Technical Press Inc., New York.
13. Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Boote, K. J., Hunt, L. A., Singh, U., Lizaso, J. L., White, J. W., Uryasev, O., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V., & Tsuji, G. Y. (2015). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (www.DSSAT.net). DSSAT Foundation, Prosser, Washington.
14. Islama, A., Ahuja, R. L., Garciab, L. A., Ma, L., Saseendran, A. S., & Trout, T. J. (2012). Modeling the impacts of climate change on irrigated maize production in the Central Great Plains. *Agricaltural Water Management*, *110*(C), 94-108. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.004
15. Khabba, S., Ledent, J. F., & Lahrouni, A. (2001). Maize ear temperature. *European Journal of Agronomy*, *14*(3), 197-208. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00095-2
16. Li, X., Takahashi, T., Suzuki, N., & Kaiser, H. M. (2011). The impact of climate change on maize yields in the United States and China. *Agricultural Systems*, *104*, 348-353. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.12.006
17. Liu, Z., Hubbard, K. G., Lin, X., & Yang, X. (2013). Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global Change Biology*, *19*(11), 3481-3492. https://doi.org/10.1111/gcb.12324
18. Lobell, D. B., & Burke, M. B. (2010). On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(11), 1443-1452. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008
19. MarkSim. (2018). http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM
20. Meza, F. J., Silva, D., & Vigil, H. (2008). Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems*, *98*(1), 21-30. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.03.005
21. Mondani, F. (2018). Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (*Zea maize*) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition. *Water and Soil*, *31*(6), 1665-1678. https://doi.org/10.22067/jsw.v31i6.61895. (in Persian with English abstract).
22. Mondani, F., Karami, P., & Ghobadi, R. (2021). Simulation of moisture regimes effect on maize (Zea mays) growth and yield in Kermanshah region by CERES-Maize model. *Crop Science Research in Arid Regions*, *3*(1), 39-56. https://doi.org/10.22034/csrar.2021.280069.1091. (in Persian with English abstract).
23. Moradi, R., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2014). Effect of Climate Change on Maize Production and

Shifting of Planting Date as Adaptation Strategy in Mashhad. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *23*(4), 111-130. (in Persian with English abstract).
24. Muchow, R. C., Sinclair, T. R., & Bennett, J. M. (1990). Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agronomy Journal*, *82*(2), 338-343. https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200020033x
25. Ozkan, B., & Akcaoz, H. (2002). Impacts of climate factors on yields for selected crops in southern Turkey. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *7*, 367-380. https://doi.org/10.1023/A:1024792318063
26. Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2018). Adaptation strategies to lessen negative impact of climate change on grain maize under hot climatic conditions: A model-based assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, *253*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.032
27. RCP. (2014). https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathway
28. Rezaei, E. E., Webber, H., Gaiser, T., Naab, J., & Ewert, F. (2015). Heat stress in cereals: mechanisms and modelling. *European Journal of Agronomy*, *64*, 98-113. https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.10.003
29. Rosenzweig, C., & Tubiello, F. N. (2007). Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *12*, 855-873. https://doi.org/10.1007/s11027-007-9103-8
30. Rowhani, P., Lobell, D. B., Linderman, M., & Ramankutty, N. (2011). Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and Forest Meteorology*, *151*(4), 449-460. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.12.002
31. Sarker, K. K., Akanda, M. A., Biswas, S. H., Roy, D. K., Khatun, A., & Goftar, M. A. (2016). Field performance of alternate wetting and drying furrow irrigation on tomato crop growth, yield, water use efficiency, quality and profitability. *Journal of Integrative Agriculture*, *15*(10), 2380-2392. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61370-9
32. Schoper, J. B., Lambert, R. J., & Vasilas, B. L. (1987). Pollen viability, pollen shedding and combining ability for tassel heat tolerance in maize. *Crop Science*, *27*(1), 27-31. https://doi.org/10.2135/cropsci1987.0011183X002700010007x
33. Shiri, M. (2018). The mitigation of climate change effect on maize grain yield by changing of planting date in Moghan. *Cereal Research*, *7*(4), 563-578. https://doi.org/10.22124/c.2018.5574.1216. (in Persian with English abstract).
34. Smit, B., & Skinner, M. W. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, *7*(1), 85-114. https://doi.org/10.1023/A:1015862228270
35. Southworth, J., Randolph, J. C., Habeck, M., Doering, O. C., Pfeifer, R. A. Rao, D. G., & Johnston, J. J. (2000). Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *82*, 139-158. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00223-1
36. Srivastava, A. K., Mboh, C. M., Zhao, G., Gaiser, T., & Ewert, F. (2018). Climate change impact under alternate realizations of climate scenarios on maize yield and biomass in Ghana. *Agricultural Systems*, *159*, 157-174. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.011
37. Teixeira, E. I., Fischer, G., Velthuizen, H., Walter, C., & Ewert, F. (2013). Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, *170*, 206-215. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.002
38. Tingem, M., & Rivington, M. (2009). Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *14*, 153-168. https://doi.org/10.1007/s11027-008-9156-3
39. Trnka, M., Dubrovsky, M., & Ekzalud, Z. (2004). Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. *Climatic Change*, *64*, 227-255. https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024675.39030.96
40. Tubiello, F. N., Jagtap, S., Rosenzweig, C., Goldberg, R., & Jones, J. W. (2002). Effects of climate change on US crop production from the National Assessment. Simulation results using two different GCM scenarios. Part I: Wheat, Potato, Corn, and Citrus. *Climate research*, *20*(3), 259-270. https://doi.org/10.3354/cr020259
41. Tubiello, F. N., Soussana, J. F. O., & Howden, S. M. (2007). Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(50), 19686-19690. https://doi.org/10.1073/pnas.0701728104
42. Ummenhofer, C., Xu, H., Twine, T., Girvetz, E., McCarthy, H., Chhetri, N., & Nicholas, K. (2015). How climate change affects extremes in maize and wheat yield in two cropping regions. *Journal of Climate*, *28*(12), 4653-4687. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00326.1
43. Wang, Z. R., Rui, Y. K., Shen, J. B., & Zhang, F. S. (2008). Effects of N fertilizer on root growth in *Zea mays* L. seedlings. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *6*(4), 677-682. https://doi.org/10.5424/sjar/2008064-360
44. Wheeler, T., & Vonbraun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, *341*(6145), 508-513. https://doi.org/10.1126/science.1239402
45. Zheng, B., Chenu, K., Dreccer, M. F., & Chapman, S. C. (2012). Breeding for the future: what are the potential

impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivium*) varieties? *Global Change Biology*, *18*(9), 2899-2914. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02724.x